

[別紙2]

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 長谷川 洋介

本論文は、「自由液面炭酸ガス吸収に対する高シュミット数乱流物質輸送モデルに関する研究」と題し、6章より成っている。

近年、地球規模の温暖化予測の観点から、主要な温室効果ガスである炭酸ガスの大気・海洋間の交換の予測精度の向上が強く望まれている。従来、海洋界面におけるガス交換係数を見積もる際、バルク法と呼ばれる海上風速との相関に基づく経験式が広く用いられており、大気中の炭酸ガス濃度を予測するための気候モデルにも組み込まれている。しかし、この経験式は大きくばらついた観測データをフィッティングしたものに過ぎず、十分な物理的理解に欠け、その信頼性も不十分である。一般に、炭酸ガスのような、低溶解度、且つ高シュミット数 ( $Sc = \nu / D$ ,  $D$ は液中での物質の分子拡散係数,  $\nu$ は液の動粘性係数)の物質交換では、液側界面近傍における薄い濃度境界層内部(20-200 $\mu\text{m}$ )の物質輸送機構が支配的となる。上述のミクロな輸送機構は、海上風速以外の因子、すなわち、海洋のうねり、温度成層、界面活性物質の吸着などの影響を受けるため、ガス交換係数を風速などのマクロな変数のみで整理することは妥当ではない。

近年、より一般的で、界面の化学的な状態も考慮し得る数学的モデルの構築を目標として、局所の界面情報を用いた界面物質輸送モデルが提案されている。これまで、界面情報として、界面勾配、界面発散、界面せん断などを用いた物質輸送モデルが提案されているものの、局所の速度場・濃度場の同時計測は今なお困難であり、これらモデルの物理的根拠を詳細に吟味することは可能ではない。上述の課題に対して、数値計算は強力なツールとなるが、これまで低シュミット数 ( $Sc \sim O(1)$ )でのシミュレーションに限られており、高シュミット数効果に関して知見が得られていない。

以上の背景から、本論文では、界面せん断により生成される数センチメートルオーダーの気液乱流場、及び付随する高シュミット数物質輸送を数値シミュレーションにより再現している。この際、従来計算例のない高シュミット数 ( $Sc = 100$ )における濃度場の計算を行うため、ハイブリッド DNS/LES 法を開発し、界面物質輸送を支配する流体運動を明らかにし、ミクロな物理現象に基づく界面物質輸送モデルの構築を試みている。更に、そのモデルをより高レイノルズ数の流れ、あるいは汚れのある界面に適用し、モデルの検証を行っている。

第一章は序論であり、大気・海洋間のガス交換に影響を及ぼす様々な因子を物理的因子と化学的因子に大きく分類し、それらについて概説している。主に物理的因子に着目し、ガス交換係数の高精度予測のための方法論を論じた後、ミクロな物質輸送現象の理解を進めること、及び物理現象に基づいた一般的な界面物質輸送モデル構築の必要性を説いている。また、高シュミット数濃度場の数値計算を行い、局所の界面スカラー束を支配する界面情報を特定した上でモデルを構築すること、さらにモデルを高レイノルズ数流れや汚れのある界面など、より現実に近い条件下で検証する必要があると論じている。

第二章では、ハイブリッドDNS/LES法の開発を行っている。界面近傍の薄い濃度境界層内部の濃度場は直接数値計算(DNS)を適用し、その外側ではサブグリッド・スカラー束を組み込むことで、現実的な計算負荷に保ちつつ、従来例のない高シュミット数( $Sc = 100$ )における濃度場計算に成功している。可視化により、瞬間的界面スカラー束の大きな領域は斑点状の構造として確認され、液中の縦渦により誘発されるバルク流体の界面への衝突(スプラッティング)と良く対応することを明らかにしている。また、両相の大きな密度比のため、上述の縦渦構造は液側の粘性スケールで支配されており、気液間の乱流構造の相互作用は極めて弱いことが示されている。以上の結果を基に、界面スプラッティングの強度を表す界面発散は、高シュミット数においても界面物質輸送モデルに取り込むべき最も有力な界面情報であると結論付けている。

第三章では、界面発散と界面スカラー束を定量的に関係付けるモデルの構築を目的として、界面垂直方向のみを考慮した一次元移流拡散方程式の性質を調査している。具体的には、界面発散が、ある単一の周波数 $\omega$ 、振幅 $\beta$ で変動する場合を想定している。この時、上記の一次元移流拡散方程式は、適切にスケールリングすることにより、シュミット数に依存せず、 $\beta$ と $\omega$ の比のみに支配されることを示している。更に、 $\beta > \omega$ を満たす界面発散のみが界面を更新し、物質輸送を促進することを明らかにしている。この時、界面直下では対流項と拡散項の釣り合いにより濃度分布が決まるため、界面発散の強度 $\beta$ を用いて解析的に界面スカラー束を予測できるとしている。本結果は、ハイブリッド計算で得られた時系列データを用いて検証され、清浄な界面では定量的なガス交換量の予測が可能であることが示されている。

第四章では、界面物質輸送モデルをより高レイノルズ数の流れに適用し検証を行うと共に、界面物質輸送に対するレイノルズ数効果を明らかにしている。まず、ラグランジュ法に基づくシミュレーションから、レイノルズ数  $Re = 150, 300$  でガス交換係数が10%程度増加することを報告している。さらに、スカラー粒子輸送に寄与する乱流場の条件付き抽出を行い、界面下に生成される縦渦構造の長さスケールは粘性長さで整理されるものの、速度スケールはレイノルズ数の増加に伴い20%程度上昇し、ガス交換が促進されることを明らかにしている。また、従来の界面更新モデルでは、ガス交換係数に対するレイノルズ数効果を予測することはできず、一方本論文で構築されたモデルによって、定量的な予測が可能となることを示している。

第五章では、界面汚れに伴うマランゴニ効果が気液乱流場、及び界面物質輸送に与える影響を論じている。まず、マランゴニ数の増加と共に、液側の平均速度分布は壁乱流のそれに近づくものの、水平方向の速度変動は依然として大きな値を保ち、壁近傍の流れ場とは本質的に異なる性質を有していることを明らかにしている。また、界面の速度変動を渦なし成分とソレノイダル成分に分解し、自由界面乱流場に対するマランゴニ数効果は、渦なし成分の選択的な減衰であることを明らかにしている。界面汚れのある流れ場に対して数値シミュレーションを行った結果、マランゴニ数の増加と共にガス交換係数は著しく減少し、さらにマランゴニ数を増加させると固体壁面のデータに収束することを明らかにしている。これは、界面を更新する速度変動の著しい減少で説明され、界面を更新する速度変動を抽出し、本論文の界面物質輸送モデルを適用することによって、ガス交換係数の定量的予測が可能であるとしている。更にマランゴニ数が増加すると、界面を更新する速度変動の大部分が減衰し、物質輸送機構が自由界面から固体壁面へと移行することを述べている。

第六章は結論であり、本論文で得られた成果をまとめている。

以上、本論文では、ミクロな物理現象に基づく一般的な界面物質輸送モデルの構築を目的とし、ハイブリッド DNS/LES 法による高シュミット数濃度場の数値シミュレーションを行い、物質輸送を支配する流体運動を特定している。その結果、界面の更新が界面物質輸送の本質であり、この時、界面下の濃度分布は対流項と拡散項の釣り合いで決定され、界面発散によって局所の界面スカラー束を定量的に予測できることを明らかにした。さらに、構築された界面物質輸送モデルをより現実的な界面、すなわち高レイノルズ数流れ、及び汚れのある界面に適用し、その予測に一般性があることを示している。

これらの結果は、地球環境問題や化学製造プロセスにおける気液界面物質輸送現象機構に重要な知見を加え、それらの数値予測精度の向上にも繋がるもので、熱流体工学をはじめ機械工学の上で寄与するところが大きい。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。